



**Двадцатая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические
основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально
опасных явлений и объектов)»**

Валидация алгоритма восстановления коэффициентов отражения земной поверхности из данных MODIS, учитывающего влияние неоднородности земной поверхности

Тарасенков М.В., Энгель М.В., Белов В.В., Зимовая А.В., Богданова А.С.

14 - 18 ноября 2022 г., Москва



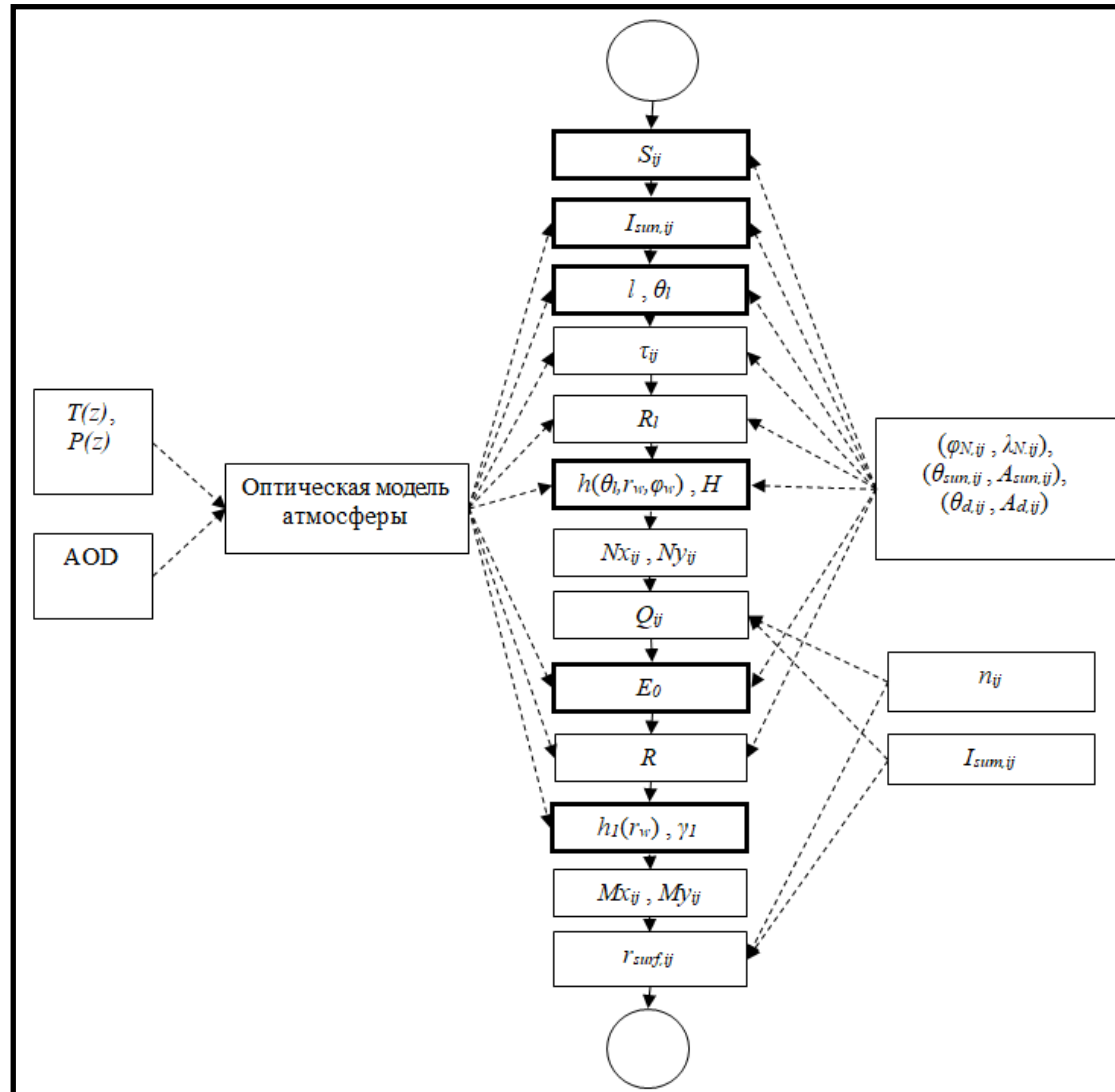
Введение

Алгоритмы восстановления коэффициентов отражения земной поверхности по данным спутниковых измерений развиваются более 50 лет, начиная с таких работ как [1]. К настоящему моменту существуют десятки вариантов решения этой проблемы. Алгоритмы, в которых основой является решение уравнение переноса излучения, называют RTM-алгоритмами. Между собой они различаются по учету/не учету факторов: 1) неламбертовость поверхности, 2) боковой подсвет, 3) многократное отражение, 4) поглощение, 5) поляризация излучения, 6) рельеф поверхности. В работе [2] нами был предложен алгоритм восстановления коэффициентов отражения земной поверхности, который позволяет точно учесть боковой подсвет, многократное отражение, поглощение и поляризацию излучения. В данной работе рассмотрена валидация предложенного алгоритма по данным MODIS с наземными измерениями участка Португалии, полученными в работе [3].



1. *Otterman J., Fraser R.S.* Adjacency effects on imaging by surface reflection and atmospheric scattering: cross radiance to zenith // *Applied optics*. 1979. V. 18. No. 16. P. 2852-2860
2. *Тарасенков М. В., Зимовая А. В., Белов В. В., Энгель М. В.* Восстановление коэффициентов отражения земной поверхности по спутниковым измерениям MODIS с учетом поляризации излучения // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 08. С. 641–649.
3. *Cerasoli S., Campagnolo M., Faria J., Nogueira C., Calreira M.C.* Hyperspectral Reflectance in Grassland Plots Undergoing Different Fertilization Regimes in Central Portugal from March to June 2016. 2018. PANGAEA

Алгоритм восстановления коэффициентов отражения



Для получения результатов выполняются следующие действия:

1. Формирование блока исходных данных. Исходными данными являются: интенсивности принятого в канале MODIS излучения ($I_{sun,ij}$; i – номер строки пикселя, j – номер столбца пикселя); аэрозольные оптические толщины (AOT) атмосферы; вертикальный профиль температуры ($T(z)$) и давления ($P(z)$); маска облачности (n_{ij}); информация о взаимном положении наблюдаемых пикселей, Солнца и спутника (координаты пикселя ($\varphi_{N,ij}, \lambda_{N,ij}$), направление на Солнце ($\theta_{sun,ij}, A_{sun,ij}$), направление на спутник ($\theta_{d,ij}, A_{d,ij}$)). Источниками этих данных являются тематические продукты MODIS: MOD021, MOD03, MOD07, MOD35.
2. Построение модели атмосферы. Коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния и ослабления строились с помощью разработанной программы по спутниковым измерениям MOD08 – данных спутниковых измерений параметров атмосферы средних за день с шагом 1 градус по координатам.
3. Расчет площадей пикселей снимка S_{ij} . Рассматриваемый снимок разбивался на участки по близости к центрам пикселей.
4. Расчет интенсивности излучения $I_{sun,ij}$, не взаимодействовавшего с земной поверхностью с учетом поляризации излучения.
5. Определение количества l и границ θ_l изопланарных зон (зон, где можно использовать одну ФРТ канала формирования бокового подсвета [1]).
6. Расчет прямого пропускания трассы наблюдаемый пиксель – приемная система τ_{ij} .
7. Расчет радиусов бокового подсвета для изопланарных зон R_l .
8. Расчет ФРТ канала формирования бокового подсвета для каждой изопланарной зоны $h(\theta_l, r_w, \varphi_w)$ и ее интеграла по поверхности $H(\theta_l)$.
9. Оценка количества пикселей снимка (по строкам Nx_{ij} и столбцам снимка Ny_{ij}) в пределах области формирования бокового подсвета R_l для каждого пикселя.
10. Решение системы линейных алгебраических уравнений относительно светимости наблюдаемых пикселей Q_{ij} .



11. Расчет освещенности земной поверхности без учета отраженного излучения E_0 .
12. Расчет радиусов формирования дополнительной освещенности земной поверхности R пикселями поверхности.
13. Расчет ФРТ канала формирования дополнительной освещенности земной поверхности $h_I(r_w)$ и ее интеграла γ_I . Построение аппроксимации функции $h_I(r_w)$.
14. Оценка количества пикселей снимка (по строкам Mx_{ij} и столбцам снимка My_{ij}) в пределах области формирования дополнительной освещенности земной поверхности R для каждого пикселя.
15. Решение системы нелинейных уравнений относительно коэффициента отражения земной поверхности $r_{surf,ij}$.

Для реализации алгоритма были созданы 8 программ метода Монте-Карло для определения величин: S_{ij} , $I_{sun,ij}$, l , $h(\theta_l, r_w, \varphi_w)$, $H(\theta_l)$, E_0 , $h_I(r_w)$, γ_I [1].



Валидация алгоритма по наземным измерениям

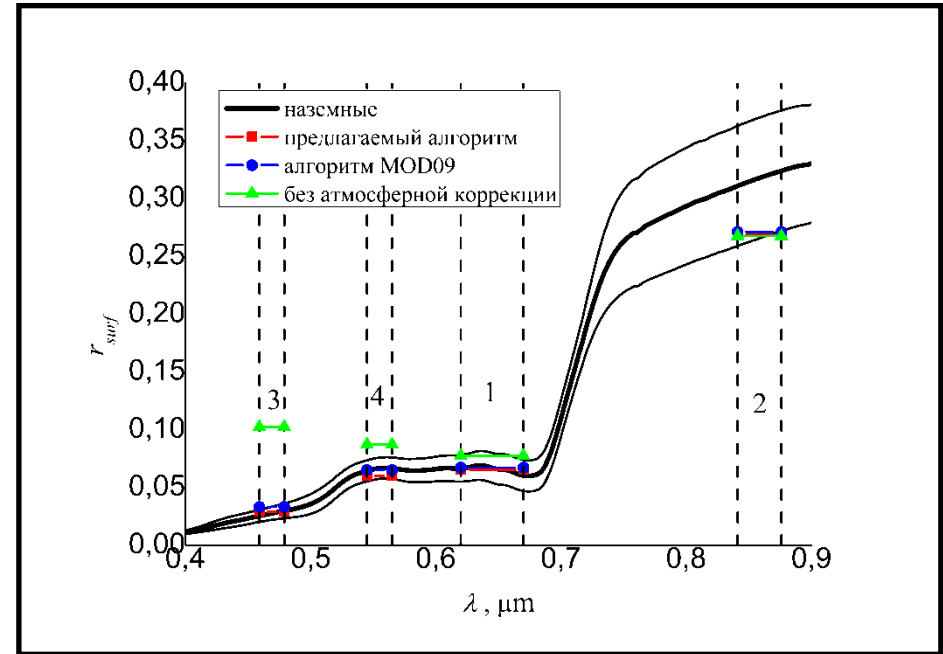
В 2016 г. в точке с координатами 38.829° с.ш. 8.791° з.д. авторы работы [1] проводили серию наземных измерений коэффициентов отражения. За основу были взяты данные наземных измерений за 20.05.2016 г. Это гиперспектральные измерения с шагом в 0.001 мкм. Данные сопоставлялись с результатами для 4 каналов MODIS (центры каналов $\lambda=0.645, 0.858, 0.469$ и 0.555 мкм), полученными предлагаемым алгоритмом, данными MOD09 и результатами, полученными без выполнения атмосферной коррекции по формуле:

$$r_{surf, no\ cor, ij} = \frac{\pi I_{sum, ij}}{\pi S_{\lambda} \mu_{sun, ij}} \quad \mu_{sun} = \cos \theta_{sun}$$

где πS_{λ} — солнечная постоянная.

Результаты восстановления коэффициентов отражения для тестовой точки приведены на рисунке. Для наземных измерений отложены коэффициенты отражения средние по рассматриваемым 24 точкам и их СКО. Сравнение данных на рисунке показывает, что результаты без атмосферной коррекции (символы 4 на рисунке 2) для каналов №3 и 4 значительно отличаются от наземных измерений и от результатов алгоритмов атмосферной коррекции. В канале №2 для рассматриваемой ситуации результаты без атмосферной коррекции отличаются от результатов алгоритмов атмосферной коррекции незначительно. Также из рисунка следует, что результаты, полученные предлагаемым алгоритмом и алгоритмом MOD09 лежат в пределах СКО от средних значений наземных измерений. Для каналов №1 и №2 результаты, полученные этими алгоритмами для тестовой точки отличаются незначительно.

1. Cerasoli S., Campagnolo M., Faria J., Nogueira C., Calreira M.C. Hyperspectral Reflectance in Grassland Plots Undergoing Different Fertilization Regimes in Central Portugal from March to June 2016. PANGAEA



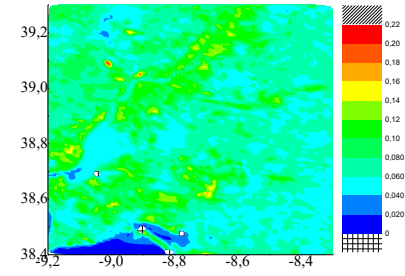
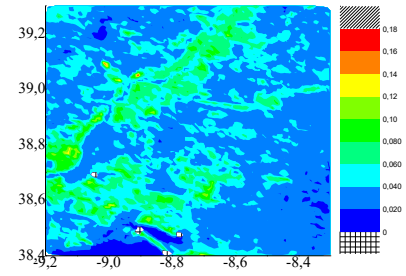
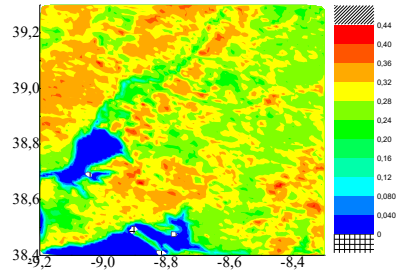
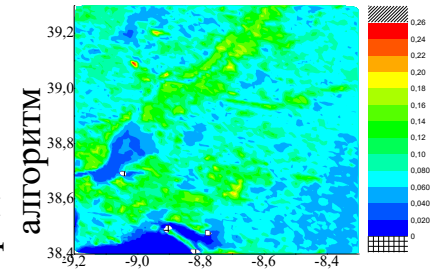
Канал 1

Канал 2

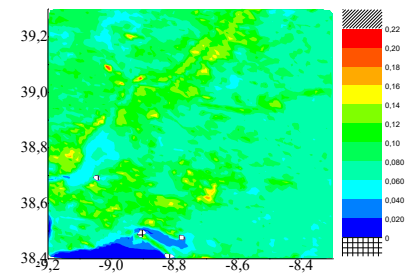
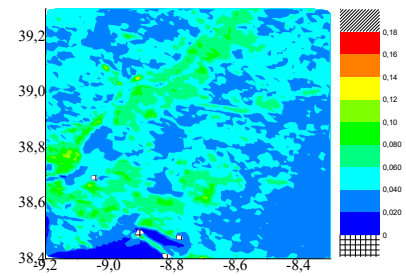
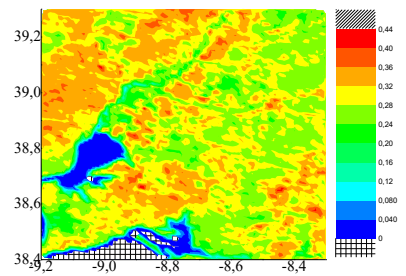
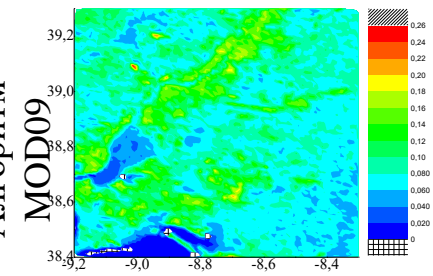
Канал 3

Канал 4

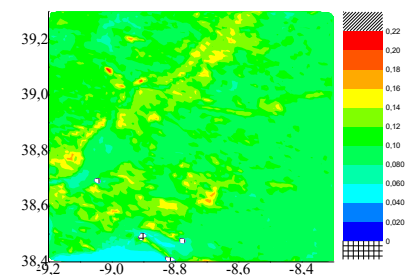
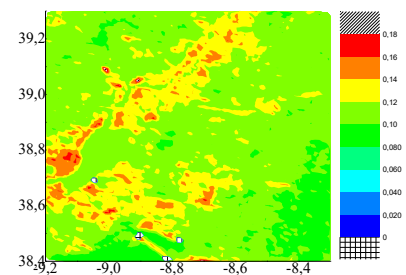
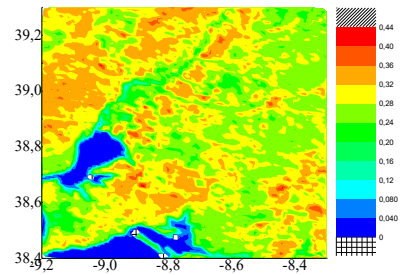
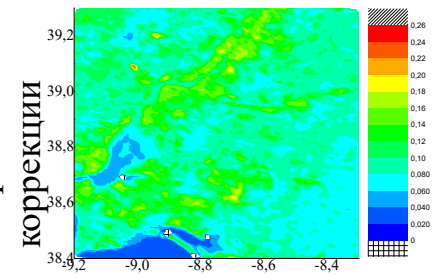
Предлагаемый алгоритм



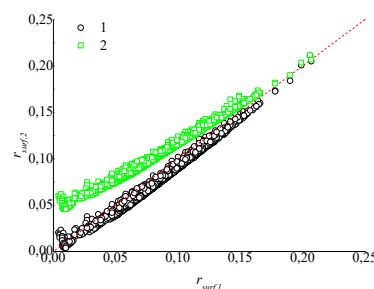
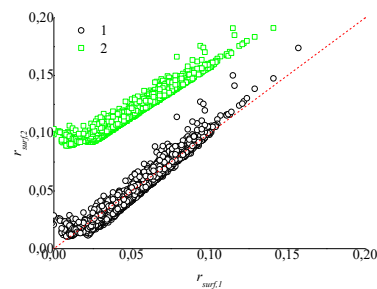
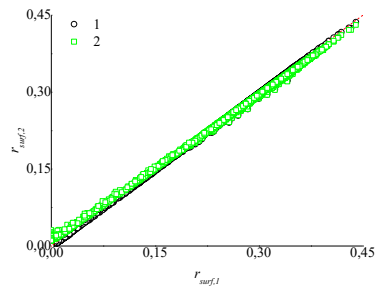
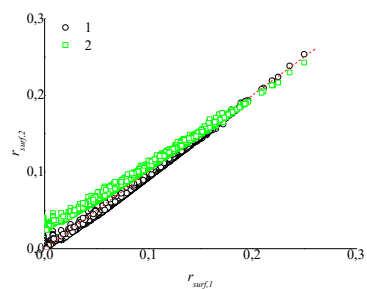
Алгоритм MOD09



Алгоритм без коррекции



Сопоставление результатов. По оси Ох MOD09, по оси Оу предлагаемый алгоритм (символы 1) и без коррекции (символы 2)



Результаты валидации предлагаемого алгоритма

| № канала MODIS | Отличие от средних наземных измерений | | | Отличие результатов MOD09 и предлагаемого алгоритма | | |
|----------------------|--|--------|--------------|--|---------------------------------------|----------------------------------|
| | Без коррекции | MOD09 | предлагаемый | Коэффициент корреляции | Максимальное абсолютное отличие | Среднее абсолютное отличие |
| 1 | 0,0746 | 0,0055 | 0,0014 | 0,998 | 0,024 | 0,003 |
| 2 | 0,0209 | 0,0011 | 0,0062 | 1,000 | 0,021 | 0,003 |
| 3 | 0,0114 | 0,0011 | 0,0004 | 0,991 | 0,048 | 0,004 |
| 4 | 0,0502 | 0,0465 | 0,0492 | 0,997 | 0,024 | 0,003 |

Заключение

1. Выполненная валидация алгоритма подтверждает необходимость выполнения атмосферной коррекции спутниковых данных при восстановлении коэффициентов отражения.
2. Сопоставление наземных измерений для участка с координатами 38.829° с.ш. 8.791° з.д. с данными MOD09 и предлагаемого алгоритма показывает, что полученные результаты лежат в пределах СКО от средних по участку наземных измерений.
3. Для каналов №1 и 2 MODIS результаты алгоритмов для тестовой точки отличаются незначительно. Для канала №3 результаты предлагаемого алгоритма ближе к среднему по наземным измерениям значению, чем MOD09, а для канала №4 – результаты MOD09 ближе к среднему значению.
4. Анализ результатов, полученных алгоритмами для участка снимка с координатами $38.4-39.3^{\circ}$ с.ш., $8.3-9.2^{\circ}$ з.д. показывает, что для каналов №1 и 2 алгоритм MOD09 для некоторых участков, покрытых водой, дает отрицательные коэффициенты отражения.
5. Выполненная валидация показывает предпочтительность использования предлагаемого алгоритма для восстановления коэффициентов отражения территорий, покрытых растительностью в период вегетации.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН с использованием данных станции приема спутниковой информации ЦКП “Атмосфера”.



Спасибо за внимание!

Вопросы, возникшие вне сроков проведения конференции,
можно направить на e-mail: TMV@iao.ru

